مجلة الدراسات الأثرية
مجلد:16 /عدد:2018/01
ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

الملاط الجيري في المنشآت المائية في الفترة الرومانية

د/ بلعيبود بدرالدين
معهد الآثار
belaiboud.badrou@gmail.com

الملخص:

استعمل الرومان في المنشآت المائية ملاط جيري له صلابة عالية ومقاومة جيدة في الوسط الرطب، وهو ما يعرف بالملاط الروماني أو ملاط القرميد، والميزة الأساسية التي يوفّرها هذا النوع من مواد البناء هي الخاصية المائية الناتجة عن إضافة مادة البوزولان أو مسحوق القرميد أو الآجر، حيث يتم الحصول على هذه الخاصية من خلال تفاعلات كيميائية بين الجير والمواد المضافة.

الكلمات المفتاحية: جير مائي، ملاط القرميد، منشآت مائية، عمارة رومانية، المائية

Résumé :

Les romains ont utilisé dans leurs structures hydrauliques un mortier de chaux, qui se caractérise par sa solidité et par sa résistance sous l'eau et dans le milieu humide. Ce mortier, dit romain, est une combinaison entre la chaux aérienne, déjà connue, et des matériaux qui donnent après des réactions chimiques l'hydraulicité au mortier, tels la pouzzolane ou du tuileau pilé.

Mots clefs : Chaux hydraulique, mortier, tuileau, construction romaine, hydraulicité

مقدمة:

عرفت الحضارة الرومانية تقدما تقنيا كبير في مجال العمارة والبناء، ومن بين المنشآت التي أوليت لها اهتماما كبيرا هي المنشآت المائية، لما لها من أهمية بالغة في شتى مناحي الحياة اليومية، كالحمامات العامة وقنوات جلب المياه والنافورات والعيون العامة والخزانات المائية العامة والخاصة، حيث استطاع الرومان من تشكيل ملاط جيري يتميّز بمقاومة كبيرة في الوسط المائي والرطب أطلق عليه في القرن 19 م اسم الإسمنت الروماني.

إن استعمال الملاط الجيري يعود لفترة أقدم، وتحديدا خلال الحضارة الإغريقية، حيث أظهرت دراسات أثرية استعمال الجير المائي الطبيعي في العديد من المنشآت المعمارية في عدة مواقع على غرار "دلف" و"ثيرة". استطاع الرومان صناعة رابط مائي صناعي لأول مرة في التاريخ، وذلك بإضافة رماد بركاني غنّي بالسيليس والألومين استخرج من سفح بركان "فيزوف"، وتحديدا من منطقة "بوسيولي" (Pozzuoli) قرب مدينة نابولي، ومنه جاءت تسمية البوزولان لهذا الرماد المضاف للجير.[1]

I- صناعة الجير في الفترة القديمة:

كانت تقوم هذه الصناعة على حرق الحجر الكلسي بطرق بدائية لاستخراج مادة الجير، فخلال الفترة القديمة بنيت أفران خاصة لهذا الغرض، وتعتمد صناعة الجير على الكلس النقي كمادة أولية، ويشترط ان تكون نسبة كربونات الكالسيوم **$CaCO_3$** عالية جدا، فبالنسبة للجير الهوائي يجب أن تفوق هذه النسبة 95% وبالنسبة للجير المائي الطبيعي تكون هذه النسبة بين 80 – 85 % و15 – 20 % من الغضار، ويتم صناعة الجير حسب الخطوات التالية:

1- الاستخراج:

تستخرج المادة الأولية من المحاجر الكلسية والترسبات الطباشيرية المشكّلة اساسا من **$CaCO_3$**، كما يمكن استخراج المادة الأولية من محاجر الكلس المغنيزي أو ما يعرف بالدولومي **$(Ca, Mg)\ CO_3$**، حيث ينتج عن هذه المادة بعد عملية الحرق خليط من أكسيد الكالسيوم **CaO** وأكسيد المغنزيوم **MgO** وهو عبارة عن جير مغنيزي، ويسمى أيضا جير دولوميتي، كما يتم تكسير الكتل الحجرية إلى قطع صغيرة يسهل إدخالها في الأفران ولكي تتم عملية الحرق بشكل تام.[2]

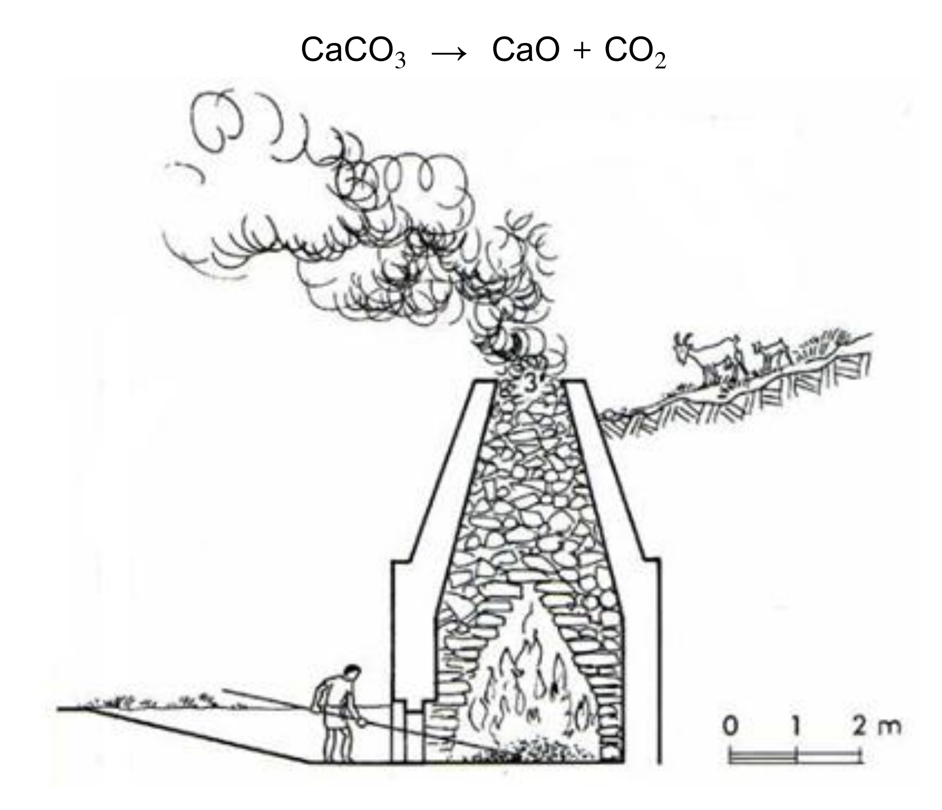
[1] Adam (J.P), *La construction romaine : Matériaux et techniques*, grands manuels Picard, Paris 1995, p77-78
[2] Schuler (T), *La chimie des chaux hydrauliques naturelles*, Maisons Paysannes de France, 2013

مجلة الدراسات الأثرية
مجلد:16 /عدد:2018/01
ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

2- الحرق:

تقوم العملية الثانية لصناعة الجير على حرق الحجارة الكلسي في أفران خاصة بعدما كان الحرق يتم بطريقة بدائية (**الصورة:** 01، **الشكل:** 01، 02)، في الفترة القديمة كانت تتراوح درجة حرارة الحرق بين 700 – 900 °م، حيث تتحوّل الحجارة الكلسية إلى أكسيد الكالسيوم، وهو ما يعرف بالجير الحي، ويرافق هذا التفاعل انطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون، كما يعتبر هذا التفاعل ماص للحرارة، وذلك وفق المعادلة التالية:[3]

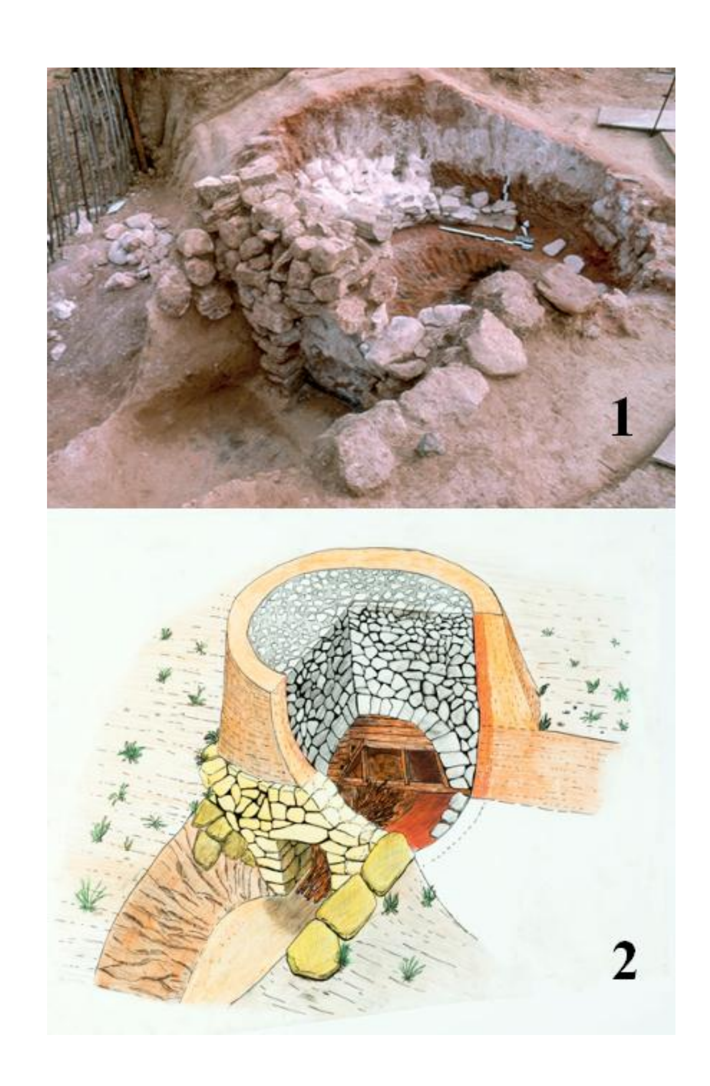
$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$



الشكل (01): فرن لحرق الجير حسب "كاتون"
عن (Adam J.P 1995)

[3] Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, trad. Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986, p 69

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018



الصورة (01): فرن لحرق الجير يعود للفترة الرومانية

الشكل (02): إعادة تصوّر للفرن

عن (LERM)*

* LERM : Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, Arles, France

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

3- الاطفاء:

نقصد بإطفاء الجير ذلك التفاعل الكيميائي بين الجير الحي والماء، حيث يتحّول الجير من حي (أكسيد الكالسيوم) إلى مطفأ (هيدروكسيد الكالسيوم)، وتتم هذه العملية عن طريق الغمر في الأحواض حيث يمكن الاحتفاظ بعجينة الجير لعدة أشهر وحتى لعدة سنوات أو عن طريق الرش، ويعتبر هذا التفاعل الكيميائي طارد كبير للحرارة، ويتم وفق المعادلة التالية:[4]

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca\ (OH)_2$$

4- التصلّب:

إن تصلّب* الجير ناتج عن تفاعل كيميائي بين الجير المطفأ (هيدروكسيد الكالسيوم) وغاز ثاني اكسيد الكربون حسب المعادلة التالية:[5]

$$Ca\ (OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

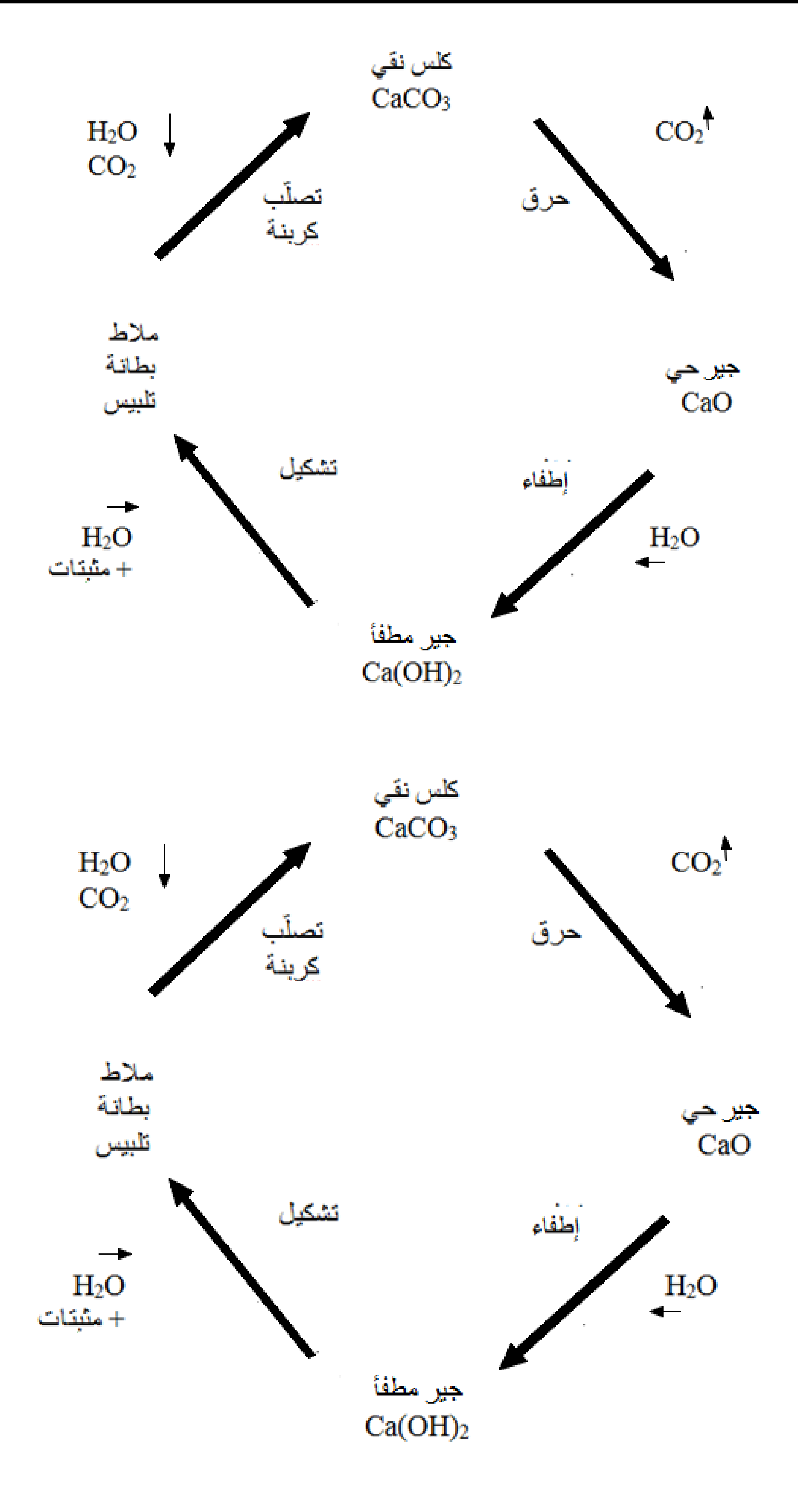
ويمكن تلخيص مراحل صناعة الجير انطلاقا من مرحلة المادة الأولية إلى مرحلة التصلّب من خلال الدورة التالية:

[4] Torraca (G), Op cit, p 69

* في كثير من المراجع باللغة العربية يطلق مصطلح "الأخذ" على تصلّب الجير أو باقي الروابط، وهي ترجمة حرفية من اللغة الجنبية: (Prise) بالفرنسية و بالانجليزية (Hold) ، إن توظيف مصطلح "تصلّب" أو "تكلّس" ربما يكون أقرب لمعنى عودة الرابط أو الملاط إلى الحالة الصلبة.

[5] Torraca (G), Op cit, p70

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018
مجلة الدراسات الأثرية
مجلد:16 /عدد:2018/01



الشكل (03): دورة الجير

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

مجلة الدراسات الأثرية
مجلد:16 /عدد:2018/01

II- الملاط الجيري المائي:

1- الملاط المائي حسب "فيتروف":

يعتبر "فيتروف" – الذي عاش خلال القرن الأول ق.م– أهم مصدر روماني في مجال تقنيات البناء، حيث تناول كيفية تحضير الملاط في الجزء الثاني من كتابه "دي اركيتيتورا" (De Architectura) وتكلّم عن مادة البوزولان المستخدمة في الملاط الروماني، ووصف المادة على أنها مسحوق من أصل بركاني يخلط بالجير والرمل ويتصلب عند خلطه بالماء، أما الطريقة الثانية لتحضير الملاط فهي إضافة مسحوق الآجر أو القرميد، حيث عبّر عليه "فيتروف" بمصطلح "تيستا" (Testa)، ويشترط أن يكون القرميد المطحون من أصل غضار الكاولينيت الذي يحترق في درجة حرارة بين 600 – 900 °م، ولهذا السبب إلتبس على الكثير من الباحثين في مجال علم الآثار في عدم حصولهم على ملاط روماني بسبب عدم استعمالهم لقرميد أو آجر من أصل كاولينيتي، كالقرميد الإيليتي الذي لا يعطي الخصائص المائية للجير.[6] وحسب "فيتروف" يتم تحضير الملاط حسب إحدى التوليفات التالية:

الرابط (حصّة)	المثبتات (حصّة)	الماء (%)
الجير (1)	رمل المحجرة (3)	15 – 20 %
الجير (1)	رمل الواد أو رمل بحري (2)	15 – 20 %
الجير (1)	رمل الواد أو رمل بحري (2) قرميد مسحوق (1)	15 – 20 %
الجير (1)	بوزولان (2)	15 – 20 %

الجدول (01): توليفات تحضير الملاط حسب "فيتروف"
عن (Davidovits (F), 1995

[6] Davidovits (F), *Les mortiers de pouzzolane artificielles chez Vitruve: évolution et historique architecturale*, thèse DEA les cultures de l'antiquité classique, Université Paris X – Nanterre, 1992-1993, p 13-15

2- آلية التفاعلات الكيميائية:

بالنسبة للجير الطبيعي فالإضافة لـ **CaO** الناتجة تتشكّل سيليكات الكالسيوم عن عملية الحرق، بنسبة كبيرة حسب المعادلة التالية:

$$2\,CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow (2CaO, SiO_2) + 2\,CO_2$$

بينما عند إضافة مواد بوزلانية للجير كمسحوق القرميد أو الآجر ذو الأصل الكاولينيتي، الذي يتشكّل بنسبة كبيرة من السيليس ونسبة أقل من الألومين للجير المطفأ والماء، نتحصّل على سيليكات الكالسيوم حسب المعادلة الكيميائية التالية:

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaO.SiO_2 + H_2O$$

تنشأ الخاصية المائية للجير انطلاقا من هذه المركبات الكيميائية المتشكّلة، أما فيما يخص جزيئات **CaO** التي بقيت حرة فسوف تشكّل الجانب الهوائي لتصلب الجير، لذا فإن تصلّب الجير المائي دائما يرافقه تصلّب هوائي اضافة للتصلب المائي. بوجود الماء تتشكّل سيليكات وألومينات مميّهة غير قابلة للذوبان في الماء، ويتراوح هذا التصلب من 20-80 % وذلك حسب معامل المائية (i) للجير، ويمكن تفسير التصلّب المائي للجير حسب المعادلة الكيميائية التالية:

$$2\,(2CaO, SiO_2) + 4\,H_2O \rightarrow (3CaO, 2SiO_2, 3H_2O) + Ca(OH)_2$$

باتصال الجير مع الهواء تتم عملية كربنة الجير، وذلك مع جزئيات **CO_2** الموجودة في الجو، لتتشكّل من جديد **$CaCO_3$**، وهذا التفاعل الكيميائي يمثّل الجانب الهوائي لتصلب الجير المائي، حيث تختلف نسبته مقارنته بالتصلب المائي حسب المعامل (i)، ومن الضروري إطفاء الجير المائي بكمية محدّدة من الماء لإطفاء الجزيئات الحرة من **CaO**، لأن أي كمية إضافية تؤدي لبداية تصلب الجزيئات غير الجيرية.[7]

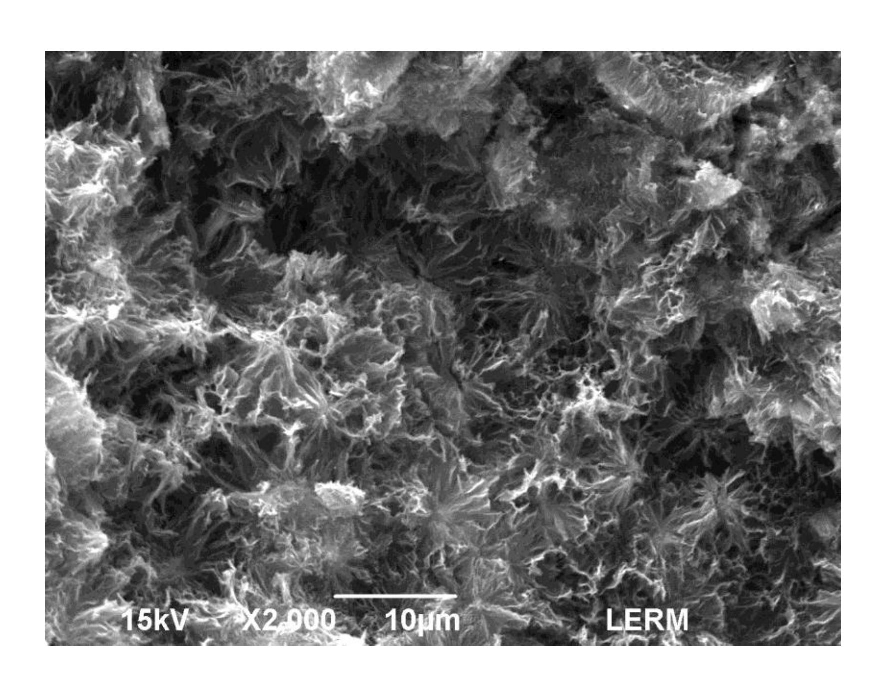
[7] Schuler (T), Op cit

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

عند الاتصال مع الماء تتصلب في البداية سيليكات الكالسيوم بسبب ارتفاع نسبة وجودها مقارنة بألومينات الكالسيوم والألومينات الحديدية للكالسيوم، كما تنتج عن هذا التفاعل الكيميائي جزيئات **$Ca(OH)_2$** التي تضاف للجير المطفأ الموجود سلفا، وذلك وفق المعادلة التالية:

$$2(2CaO,SiO_2) + 4\ H_2O \rightarrow (3CaO,2SiO_2.3H_2O) + Ca\ (OH)_2$$

تتشكّل بعد عملية الإطفاء سيليكات الكالسيوم المميّهة غير القابلة للذوبان في الماء على هيئة هلام، حيث تتشكّل شبكة غير منتظمة ومتداخلة مع جزيئات الجير والمثبتات المضافة لتشكيل الملاط (الصورة: 02)، وهذا ما يفسّر صلابة الجير المائي مقارنة بالجير الهوائي، حيث أن المقاومة الميكانيكية للرابط لها علاقة طردية مع معامل المائية.[8] (الجدول: 02)



الصورة (02):صورة مجهرية (MEB) لهلام سيليكات الكالسيوم المميّهة المتشكّلة في الملاط عن (LERM)

نسبة CaO الحرة	المقاومة الميكانيكية للضغط

[8] Davidovits (F), Op cit, p 16 ; 26

(kg/cm^2)	(%)
50 − 10	80 <
70 − 20	35 <
100 − 35	25 <
150 − 50	15 <
150 <	2 >

الجدول 02 :المقاومة الميكانيكية للملاط حسب مائية الجير
عن (Schuler (T), 2013)

يتمّ التصلّب المائي (التميّه) في غصون الساعات الأولى من الاتصال بالماء، بينما التصلّب الهوائي (الكربنة) يستمرّ لعدة أيام أو أسابيع أو حتى أعوام بحسب اتصال جزيئات $Ca(OH)_2$ بغاز ثاني أكسيد الكربون وجزيئات الماء الموجودة في الهواء، وأظهرت بعض الدراسات أن سرعة التصلّب الهوائي في اتجاه العمق تقدّر بحوالي 1 سم / السنة.[9]

3− معامل المائية:

[9] Schuler (T), Op cit

بفضل أبحاث "لويس فيكا" التي ابتدأها سنة 1812 التي بيّنت ضرورة إحتواء المادة الأولية على نسبة معيّنة من الغضار للحصول على جير مائي، واقترح "فيكا" تصنيفا للجير على أساس معامل المائية (i)، وهو علاقة بين المركبات الحامضية على المركبات القاعدية:[10]

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

ومن خلال قيم معامل المائية يصنف الجير – من الأقل إلى الأعلى مائية– حسب الجدول التالي:

نوع الجير	الغضار %	المعامل "i"	مدة التصلّب بوجود الماء
هوائي	~ 0	0 – 0.10	6 اشهر
ضعيف المائية	5 – 8	0.10 – 0.16	15 – 30 يوم
متوسط المائية	8 – 15	0.16 – 0.30	10 – 15 يوم
مائي	15 – 20	0.30 – 0.40	2 – 4 يوم
عالي المائية	20 – 30	0.40 – 0.50	أقل من 2 يوم

الجدول (02): تصنيف الجير حسب معامل المائية
عن (Vicat (L.J) 1856)

كما يمكن تعريف معامل المائية أيضا على أنه العلاقة بين مجموع كتل المركبات الغضارية: السيليس والألومين وأكسيد الحديد، على مجموع كتل جزيئات الجير: أكسيد الكالسيوم وأكسيد المغنيزيوم:[11]

$$i = \frac{m(SiO_2) + m(Al_2O_3) + m(Fe_2O_3)}{m(CaO) + m(MgO)}$$

[10] Vicat (L.J), *Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments, et gangues à pouzzolanes*, Imprimerie Maisonville, Grenoble 1856, p 15
[11] Schuler (T), Op cit

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

يعتبر الألومين وأكسيد الحديد مركبات ثانوية في تركيب الغضار، وهي نسب ضئيلة إذا ما قيست بالسيليس، والأمر نفسه مع أكسيد المغنزيوم بالنسبة لأكسيد الكالسيوم (دون الأخذ بعين الإعتبار الجير المغنيزي)، لذا فإن معامل مائية الرابط تكون مجاورة للعلاقة بين السيليس وأكسيد الكالسيوم:

$$i = \frac{m(SiO_2)}{m(CaO)}$$

ويمكن الاستنتاج بأن نسبة وجود السيليس هي من تحدّد مائية الجير، لذا ففي صناعة الجير تطبّق "قيمة السيليس التوليفية" التي تسمح بتقدير – بصورة دقيقة – طبيعة الجير المتحصّل عليه.[12]

4– دور القرميد المهروس في الملاط:

بسبب استعمال مسحوق وقطع القرميد في تحضير الملاط أطلق الباحثون عليه ملاط القرميد، ويستعمل القرميد أو الآجر في شكلين هما:

- **على شكل مسحوق:**

حيث يضاف مسحوق القرميد أو الآجر من أصل كاولينيتي في عملية حرق كربونات الكالسيوم لإعطاء الخاصية المائية للجير كما وضّحنا آنفا.

- **على شكل قطع صغيرة:**

تضاف قطع القرميد إلى طبقات التلبيس الأولى المطبقة على الهيكل، حيث تكون حبيبية هذه القطع متنازلة، ففي الطبقة الأولى لملاط التلبيس تكون قطع القرميد كبيرة نوعا ما، وتتناقص أبعادها في الطبقات الموالية إلى غاية طبقة التلبيس الأخيرة (الصورة: 03)، وبما أن قطع الغضار المحروق تتميّز بمسامية عالية ما يسمح بمرور الهواء في الطبقات الداخلية للملاط المطبق، ويسمح هذا الهواء من اتمام عملية التصلّب الهوائي (الكربنة)

[12] Davidovits (F), Op cit, p 26

ISSN: 1111-7699
DOI:.16/IJO.01 /2018

لجزيئات $Ca(OH)_2$ الحرة، وتوجد القطع الكبيرة في الطبقات الداخلية أين يصعب تغلغل الهواء، لذا نلاحظ أنه كلما اتجهنا نحو العمق نجد قطع أكبر من القرميد لتسهيل عملية تغلغل الهواء في عمق الملاط.

أما بالنسبة للتلبيسات الأخيرة فتكون عبارة عن ملاط مكوّن من قرميد مسحوق ذو حبيبية دقيقة جدا وجير مطفأ ورمل، وحسب "فيتروف" دائما، فإن هذه التلبيسات الخارجية يتم ضربها بشكل جيد قبل تطبيقها.[13] وهي تتميّز بأنها غير نفوذة للماء (الصورة:04) .



الصورة 03: مقطع طولي لملاط جيري مائي (ملاط القرميد)
1: حبيبية أكبر للقرميد المهروس
2: حبيبية أصغر للقرميد المهروس
عن (LERM)

[13]Davidovits (F), Ibid, p 58



الصورة 04: تلبيس خارجي بالجير المائي

حوض لحمامات موقع خميسة – سوق أهراس

الخلاصة:

تكمن أهمية الملاط الروماني في الخاصية المائية التي توفّرها بشكل أساس سيليكات الكالسيوم المميّهة، هذه الأخيرة تتشكّل بعد تفاعل السيليس SiO_2 مع هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ بالإضافة الى تفاعلات ثانوية أخرى، وتؤهل الخاصية المائية الملاط ليكون مستعملا في المنشآت المائية نظرا لصلابته ومقاومته للماء، حيث يتصلب الجير المائي عند اتصاله بالماء (التصلّب المائي)، بالإضافة للتصلّب الهوائي (الكربنة) بالتفاعل مع غاز CO_2 الموجود في الهواء، ولتسهيل هذا التفاعل يضاف للملاط قطع مهروسة من القرميد أو من الآجر، والتي تتميّز بمسامية عالية يساعد على تغلغل الهواء إلى عمق الملاط المطبّق كي تتم عملية تصلّب الجزئيات الحرة من الجير الهوائي المشكّلة للملاط.

ISSN: 1111-7699 مجلة الدراسات الأثرية
DOI:.16/IJO.01 /2018 مجلد:16 /عدد:01/2018

قائمة المصطلحات:

Chaux vive... جير حي

Chaux éteinte.. جير مطفأ

Chaux hydraulique.................................. جير مائي

Granulométrie... حبيبيّة

Carbonatation... كربنة

Tuileau.. قرميد

Réaction endothermique.................... تفاعل ماص للحرارة

Réaction exothermique..................... تفاعل طارد للحرارة

Prise.. تصلّب

Enduit.. تلبيس

Argile... غضار

Hydraulicité.. مائية

Hydraté... مميّه

المراجع:

Adam (J.P), *La construction romaine : Matériaux et techniques*, grands manuels Picard, Paris 1995.

Davidovits (F), *Les mortiers de pouzzolane artificielles chez Vitruve: évolution et historique architecturale*, thèse DEA les cultures de l'antiquité classique, Université Paris X – Nanterre, 1992-1993.

Schuler (T), *La chimie des chaux hydrauliques naturelles*, Maisons Paysannes de France, 2013.
http://lorraine.maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/sites/15/2014/01/2-Chimie-chaux-hydrauliques-naturelles.pdf

Torraca (G), *Matériaux de construction poreux*, trad. Di Matteo (C), ICCROM, Rome 1986.

Vicat (L.J), *Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments, et gangues à pouzzolanes*, Imprimerie Maisonville, Grenoble 1856.